

## 南亚热带杉木、红锥人工林碳储量及分配特征<sup>\*</sup>

赵 樟<sup>1</sup>, 温远光<sup>2,3,4</sup>, 周晓果<sup>2,4\*\*</sup>, 朱宏光<sup>2,3</sup>, 王 磊<sup>2</sup>, 蔡道雄<sup>1,3</sup>, 贾宏炎<sup>1,3</sup>, 明安刚<sup>1,3</sup>, 卢立华<sup>1,3</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; 2. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 4. 广西科学院生态产业研究院, 广西南宁 530007)

**摘要:**明确南亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)人工林碳储量及分配特征, 可为应对全球气候变化研究提供基础数据, 为碳汇林业发展提供科学依据。以我国亚热带地区广泛栽培的杉木人工林和红锥人工林为研究对象, 以相对生长方程计算林木生物量, 实测林下植被生物量、林木和林下植被各组分含碳率、土壤含碳率等, 进而分析不同人工林的碳储量及分配规律。结果表明: (1) 人工林生态系统不同组分的含碳率存在一定差异, 虽然杉木和红锥的全株含碳率相差无几, 分别为 48.04% 和 47.80%, 但林下植被和土壤表层的含碳率差别较大, 林下植被含碳率为 40.84%—47.73% (杉木林)、36.69%—43.76% (红锥林); 土壤表层含碳率为 2.28%—3.30%; (2) 杉木人工林乔木层碳储量(71.48 t/hm<sup>2</sup>)、林下植被碳储量(1.533 t/hm<sup>2</sup>)显著高于红锥人工林乔木层碳储量(51.82 t/hm<sup>2</sup>)和林下植被碳储量(1.185 t/hm<sup>2</sup>), 而红锥人工林枯落物层碳储量(0.673 t/hm<sup>2</sup>)显著高于杉木人工林(0.386 t/hm<sup>2</sup>); (3) 杉木人工林的皮、叶、根碳储量显著高于红锥人工林, 相反, 红锥人工林的枝碳储量(8.04 t/hm<sup>2</sup>)显著高于杉木人工林(6.00 t/hm<sup>2</sup>); (4) 杉木人工林生态系统碳储量(217.56 t/hm<sup>2</sup>)与红锥人工林生态系统碳储量(195.05 t/hm<sup>2</sup>)无显著差异, 土壤和乔木层是人工林生态系统的主要碳库, 分别占生态系统碳储量的 66.37%—72.81% 和 26.59%—32.93%。杉木人工林乔木层、林下植被和生态系统碳储量均高于红锥人工林, 红锥人工林枯落物碳储量显著高于杉木人工林, 杉木是发展碳汇林的较好树种。

**关键词:**杉木 红锥 人工林 含碳率 碳储量 分配特征

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2020)02-0120-08

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200422.003



微信扫一扫, 与作者在线交流(OSID)

### 0 引言

气候变化与碳循环密切相关, 备受全球科学界及社会的普遍关注<sup>[1-3]</sup>。陆地、大气和海洋生态系统组

成了全球的三大碳库<sup>[4]</sup>。而含有巨大碳储量的森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 是全球碳循环重要的碳库与碳汇。同时森林生态系统在调节全球气候变化、减缓温室气体浓度上升、维持全球

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(31860171, 31460121), 广西重点研发计划项目(2018AB40007), 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198114), 广西高等学校重大科研项目(201201ZD001), 广西森林生态与保育重点实验室开放课题项目(QZKFKT2017-01)和广西林业厅科研项目(桂林科学[2009]第八号)资助。

#### 【作者简介】

赵 樟(1985—), 男, 工程师, 主要从事森林生态学研究。

#### 【\*\*通信作者】

周晓果(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究, E-mail: 309847439@qq.com。

#### 【引用本文】

赵 樟, 温远光, 周晓果, 等. 南亚热带杉木、红锥人工林碳储量及分配特征[J]. 广西科学, 2020, 27(2): 120-127.

ZHAO Z, WEN Y G, ZHOU X G, et al. Carbon Stocks and Allocation Characteristics of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* Plantations in Southern China [J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(2): 120-127.

碳平衡等方面都具有重要的地位和作用<sup>[5-6]</sup>。中国是全球人工林面积最大的国家<sup>[7]</sup>, 研究表明人工林可以通过吸收、固定 CO<sub>2</sub>, 减少温室气体的排放, 从而最终缓解全球气候变暖<sup>[8-10]</sup>。因此, 深入研究人工林各组分的含碳率、碳储量及其分配规律, 对于实现陆地生态系统碳储量估算的精准化和全球碳循环研究具有重要的意义。

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是杉科杉木属的一种, 为我国特有的速生丰产的乡土针叶树种, 也是我国亚热带地区重要的优良用材树种, 广泛种植于亚热带区域, 本研究区域已是其栽培区的南缘。红锥 *Castanopsis hystrix* 是我国珍贵乡土阔叶树种, 属于壳斗科锥属植物, 喜生长于温暖湿润且海拔在 1 000 m 以下的常绿阔叶林中。红锥是我国亚热带区域主要的造林树种, 近年来被认为是代替或改造大面积针叶人工林比较理想的高价值乡土阔叶树种之一<sup>[11-12]</sup>。关于杉木人工林的碳储量研究已有一些报道<sup>[13-14]</sup>, 但对于杉木分布区南缘, 这样的研究还比较薄弱, 以至尚不能对南亚热带杉木人工林碳汇林业发展作出科学决策。近年来, 已有研究关注红锥人工林的生物量和碳储量<sup>[15-16]</sup>, 但仍有待深入研究。本研究以广西凭祥中国林业科学研究院热带林业实验中心广泛栽培的杉木和红锥人工林为研究对象, 旨在探讨南亚热带低山区杉木人工林和红锥人工林碳储量的组成、特点及分配规律, 为南亚热带杉木、红锥人工林碳储量评估的精准化、经营管理和碳汇林业发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市中国林科院热带林业实验中心伏波实验场, 地理坐标为东经 106°39′—106°59′、北纬 22°57′—22°19′。地处我国南亚热带季风气候区, 属于湿润-半湿润的气候类型。极端最高气温为 40.3℃, 极端最低气温为 -1.5℃, 年平均气温 20.5—21.7℃; 年降水量 1 400 mm, 相对湿度 80%—84%。地貌类型以低山丘陵为主, 海拔 400—650 m, 土壤为花岗岩发育成的山地红壤, 土层厚度在 100 cm 以上。人工林树种繁多, 主要有红锥、巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*、米老排 *Mytilaria laosensis*、西南桦 *Betula alnoides*、降香黄檀 *Dalbergia odorifera*、格木 *Erythrophleum fordii*、蚬木 *Excentrodendron hsienmu*、柚木 *Tectona grandis*、山白兰 *Paramichelia baillonii* 等人工阔叶林, 以及杉木、马尾松 *Pinus massoniana* 等人工针叶林。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样地布设

本研究选择伏波实验场 1993 年营造的红锥人工林及 1994 年营造的杉木人工林为研究对象。2016 年 8 月, 在上述林分的代表性地段, 各设立 3 个面积为 20 m × 20 m 样地, 各样地特征见表 1。红锥人工林的保存密度为 753 株/hm<sup>2</sup>, 郁闭度 68%—80%, 平均胸径 17.20 cm, 平均树高 15.13 m。杉木人工林保存密度 805 株/hm<sup>2</sup>, 郁闭度 53%—65%, 平均胸径 18.94 cm, 平均树高 15.62 m。林下植被种类丰富,

表 1 试验林样地概况

Table 1 Overview of the test forest plot

类型 Types	样地 Sample plots	坡向 Aspect	坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	海拔 Altitude (m)	林龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (trees/hm <sup>2</sup> )	郁闭度 Canopy density (%)
红锥人工林 <i>C. hystrix</i> plantation	1	西南 Southwest	下坡 Down slope	32	495.6	23	746	74
	2	正北 North	下坡 Down slope	34	543.4	23	857	80
	3	西北 Northwest	下坡 Down slope	27	515.0	23	657	68
杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation	1	东南 Southeast	中坡 Mid slope	29	470.6	22	793	53
	2	西北 Northwest	下坡 Down slope	30	447.3	22	856	55
	3	西北 Northwest	下坡 Down slope	37	451.6	22	767	65

灌木层主要有红锥、杉木(原伐桩萌芽)、三桠苦 *Evo-dia lepta*、九节 *Psychotria rubra*、大青 *Clerodendrum cyrtophyllum*、柏拉木 *Blastus cochinchinensis*、南酸枣 *Choerospondias axillaris* 等。草本层主要有半边旗 *Pteris semipinnata*、东方乌毛蕨 *Blechnum orientale*、金毛狗 *Cibotium barometz*、蔓生莠竹 *Microstegium vagans*、五节芒 *Miscanthus floridulus* 等。

### 1.2.2 生物量调查与样品采集

于2016年8月进行林分生物量调查,将每个样地划分为4个10 m×10 m的中样方,用于乔木层每木调查,在每个样地随机设置3个面积2 m×2 m的样方用于灌木层生物量取样,同时,设置3个面积为1 m×1 m的样方用于草本层和枯落物层生物量调查取样。

首先对样地内所有林木进行每木检尺,实测林木胸径、树高、冠幅等。在林分每木调查的基础上,依据作者早期建立的红锥和杉木生物量回归方程<sup>[11]</sup>估算林木不同器官的生物量。灌木层和草本层采用样方收获法分别测定生物量<sup>[17]</sup>。在对林下草本层的生物量进行收获前,收集每个1 m×1 m小样方内的全部枯落物并称量。同时,采集每个样地内乔木、灌木、草本和凋落物各组分样品500 g,带回实验室,于65℃下烘干至恒重,计算生物量干物质量。

### 1.2.3 土壤样品采集

在每个10 m×10 m样方内沿样方对角线方向挖3个土壤剖面,分别采集0—10 cm、10—30 cm、30—50 cm、50—100 cm土层土壤样品,采用四分法混合取样,将取好的样品放入取样袋,带回实验室自然风干后碾碎过筛,用于土壤含碳率的测定。同时,用100 cm<sup>3</sup>环刀法测定土壤容重。

### 1.2.4 含碳率测定和碳储量的计算

将烘干后的植物样品粉碎,过0.25 mm孔径筛,制成待测样品。将自然风干的土壤样品,研磨后,过0.25 mm孔径筛,制成待测样品。采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[18]</sup>测定乔木层、灌木层、草本层、枯落物层植物样品及土壤样品的含碳率,重复3次。

植被层和土壤层碳储量计算公式如下<sup>[19-20]</sup>:

$$C = B \times D, \quad (1)$$

式中, $C$ 为组分或者器官的碳储量(t/hm<sup>2</sup>), $B$ 为组分或器官的生物量(t/hm<sup>2</sup>), $D$ 为林木各器官(或植被各组分)含碳率(%)。

$$SOC_i = C_i \times D_i \times E_i, \quad (2)$$

式中, $SOC_i$ 为土壤碳储量(t/hm<sup>2</sup>), $C_i$ 代表土壤有机碳含量(g/kg), $D_i$ 代表土壤容重(g/cm<sup>3</sup>), $E_i$ 代表土层厚度(cm), $i$ 代表土层的层次。

### 1.2.5 数据统计分析

采用SPSS 19.0对实验数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同林木和不同林分含碳率、碳储量的差异性进行检验,采用LSD法进行多重比较。所有分析显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。数据绘图由Sigmaplot 10.0软件辅助完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同人工林生态系统各组分含碳率

#### 2.1.1 乔木层含碳率

从表2可以看出,杉木各器官含碳率从大到小依次为树叶>树干>树枝>树根>树皮,红锥相应为树叶>树枝>树干>树根>树皮。杉木林和红锥林乔木层各组分的平均含碳率分别是48.04%和47.80%,两个树种各器官的含碳率差异不显著( $P > 0.05$ )。

表2 杉木和红锥林木各组分的含碳率

Table 2 Carbon content of different tree components in *C. lanceolata* and *C. hystrix*

组分 Component	含碳率 Carbon content (%)	
	杉木 <i>C. lanceolata</i>	红锥 <i>C. hystrix</i>
干 Stem	49.22±2.46 <sup>ns</sup>	49.02±1.00
皮 Bark	45.47±1.43 <sup>ns</sup>	44.91±0.94
枝 Branch	49.05±2.36 <sup>ns</sup>	49.12±0.98
叶 Leaf	50.12±1.51 <sup>ns</sup>	50.18±1.32
根 Root	46.32±2.21 <sup>ns</sup>	45.75±0.81
平均 Average	48.04±1.99 <sup>ns</sup>	47.80±1.01

注:ns表示不同树种同一器官差异不显著( $P > 0.05$ )

Note:ns indicates non-significant differences among different tree species with the same component ( $P > 0.05$ )

#### 2.1.2 林下植被与枯落物的含碳率

由表3可知,杉木林下植被各组分含碳率为40.84%—47.73%,红锥林为36.69%—43.76%。杉木、红锥人工林灌木层和草本层的含碳率均为地上部分大于地下部分。方差分析表明,杉木林下灌木层地上部分和草本层的含碳率均显著高于红锥林( $P < 0.05$ )。杉木和红锥林分枯落物层含碳率分别为47.34%和48.45%,红锥林略高于杉木林,但差异不显著( $P > 0.05$ )。

表3 杉木、红锥林下植被和枯落物各组分含碳率(%)

Table 3 Carbon content of understory vegetation and litter in *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations (%)

层次 Layer	组分 Component	杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation	红锥人工林 <i>C. hystrix</i> plantation
灌木层 Shrub layer	地上部分 Above-ground	47.73±1.23*	43.76±1.11
	地下部分 Below-ground	45.68±1.01 <sup>ns</sup>	43.71±0.89
草本层 Herb layer	地上部分 Above-ground	47.57±2.03*	38.99±0.63
	地下部分 Below-ground	40.84±0.58*	36.69±1.14
枯落物层 Litter		47.34±1.21 <sup>ns</sup>	48.45±1.04

注: ns 表示不同树种同一器官差异不显著 ( $P > 0.05$ ), \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: ns indicates non-significant differences among different trees with the same component ( $P > 0.05$ ), \* indicates significant differences ( $P < 0.05$ )

### 2.1.3 土壤含碳率

杉木林和红锥林的土壤容重分别为 1.19—1.31  $\text{g}/\text{cm}^3$  和 1.07—1.37  $\text{g}/\text{cm}^3$  (表 4)。杉木林土壤含碳率均随土层深度的加深而逐渐减小, 表层土壤的含碳率是最底层土壤的 2.83 倍; 红锥林不同土层含碳率的变化与杉木林相似, 但表层与最底层的差别更大, 表层土壤的含碳率是最底层土壤的 5.4 倍。两种林分表层土壤的含碳率均显著高于其他土层 (表 4)。

表4 杉木、红锥人工林的土壤容重及含碳率

Table 4 Soil bulk density and carbon content of *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations

类型 Type	土层深度 Soil depth (cm)	土壤容重 Soil bulk density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	含碳率 Carbon content (%)
杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation	0—10	1.19±0.05 <sup>b</sup>	2.28±0.17 <sup>a</sup>
	10—30	1.21±0.04 <sup>ab</sup>	1.51±0.10 <sup>b</sup>
	30—50	1.31±0.02 <sup>a</sup>	1.20±0.11 <sup>c</sup>
	50—100	1.24±0.03 <sup>ab</sup>	0.80±0.06 <sup>d</sup>
红锥人工林 <i>C. hystrix</i> plantation	0—10	1.07±0.08 <sup>b</sup>	3.30±0.17 <sup>a</sup>
	10—30	1.37±0.05 <sup>a</sup>	1.52±0.09 <sup>b</sup>
	30—50	1.34±0.05 <sup>a</sup>	0.86±0.07 <sup>c</sup>
	50—100	1.37±0.03 <sup>a</sup>	0.61±0.04 <sup>d</sup>

注: 不同字母表示不同土层层次差异显著 ( $P < 0.05$ )

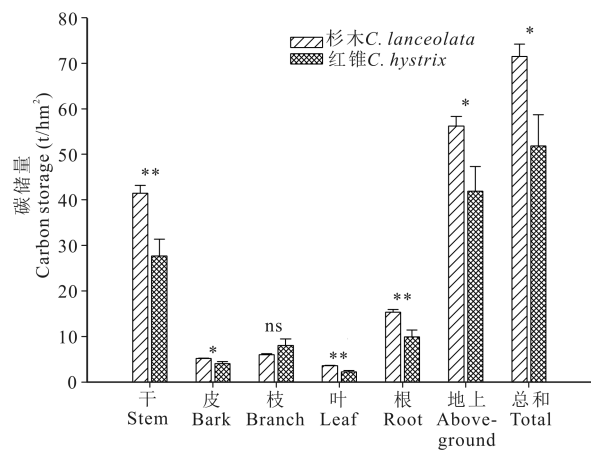
Note: Different letters indicate significant differences among different soil layer ( $P < 0.05$ )

## 2.2 不同人工林生态系统各组分碳储量及其分配特征

### 2.2.1 乔木层碳储量及其分配特征

由图 1 可知, 杉木人工林乔木层碳储量 ( $71.48 \pm 2.74$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  显著高于红锥林 ( $51.82 \pm 6.84$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ )。树干碳储量对两种林分乔木层碳储量贡献最大, 其中杉木林树干碳储量 ( $41.48 \pm 1.72$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  比红锥林 ( $27.66 \pm 3.68$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  高 33.31%, 差异极显著 ( $P = 0.004$ )。杉木林的皮、叶、根碳储量显著高于红锥林 ( $P < 0.05$ ), 相反, 红锥林树枝碳储量 ( $8.04 \pm 1.38$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  比杉木林 ( $6.00 \pm 0.20$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  高 25.38%, 但差异不显著 ( $P = 0.068$ )。

两种林分乔木层的地上、地下部分碳储量对比, 存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。杉木林的地上部分碳储量 ( $56.18 \pm 2.12$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  比红锥林 ( $41.92 \pm 5.37$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  高 25.38%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 杉木林乔木层地下部分碳储量 ( $15.29 \pm 0.62$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  比红锥林 ( $9.89 \pm 1.49$ )  $\text{t}/\text{hm}^2$  的高 35.30%, 差异极显著 ( $P = 0.004$ ) (图 1)。



\* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), ns 表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )

\* indicates significant differences ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates very significant differences ( $P < 0.01$ ), ns indicates non-significant differences

图1 杉木和红锥人工林乔木层各器官碳储量

Fig. 1 Carbon storage of different organs in tree layer of *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations

杉木、红锥人工林不同器官碳储量分配如图 2 所示, 从图 2 可以看出, 两种林分碳储量分配的大小顺序均为干 > 根 > 枝 > 皮 > 叶。但不同的是, 红锥林树干碳储量占比 (53.39%) 小于杉木林 (58.03%), 而树枝碳储量占比 (15.47%) 大于杉木林 (8.39%)。

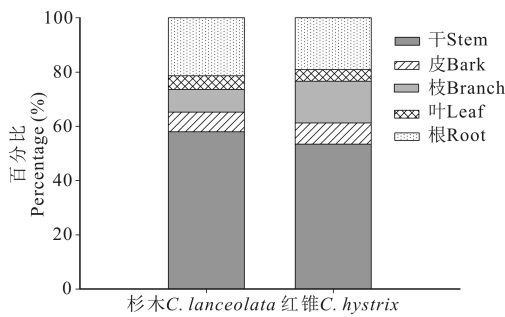


图2 杉木与红锥人工林乔木层碳储量分配特征

Fig. 2 Characteristics of carbon storage allocation of tree layer of *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations

### 2.2.2 林下植被与枯落物碳储量及其分配特征

两种林分林下植被各组碳储量如表5所示。杉木林下植被碳储量是 $(1.147 \pm 0.220) \text{ t/hm}^2$ ,红锥林下植被碳储量是 $(0.512 \pm 0.083) \text{ t/hm}^2$ ,差异极显著( $P=0.009$ )。从灌木层看,杉木林灌木层和草本层碳储量均高于红锥林,分别高出42.66%和13.19倍。杉木林灌木层地上部分碳储量是地下部分碳储量的1.73倍,红锥林灌木层地上部分碳储量是地下部分的1.82倍。和灌木层相反,红锥林草本层地下部分碳储量是地上部分碳储量的2.54倍。此外,红锥林枯落物层碳储量是杉木林的1.74倍,极显著高于杉木林。两种林分林下植被碳储量的分配特征见表5 林下植被各组碳储量( $\text{t/hm}^2$ )

Table 5 The carbon storage of understory vegetation and litter ( $\text{t/hm}^2$ )

层次 Layer	杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation	红锥人工林 <i>C. hystrix</i> plantation	
灌木层 Shrub layer	地上部分 Above-ground	$0.453 \pm 0.061^*$	$0.312 \pm 0.050$
	地下部分 Below-ground	$0.256 \pm 0.034^*$	$0.167 \pm 0.032$
	小计 Subtotal	$0.709 \pm 0.095^*$	$0.479 \pm 0.082$
草本层 Herb layer	地上部分 Above-ground	$0.226 \pm 0.062^{**}$	$0.009 \pm 0.001$
	地下部分 Below-ground	$0.213 \pm 0.063^{**}$	$0.024 \pm 0.001$
	小计 Subtotal	$0.438 \pm 0.125^{**}$	$0.033 \pm 0.001$
林下植被总计 Total of understory vegetation	$1.147 \pm 0.220^{**}$	$0.512 \pm 0.083$	
枯落物层 Litter	$0.386 \pm 0.053^{**}$	$0.673 \pm 0.058$	
总计 Total	$1.533 \pm 0.273^{**}$	$1.185 \pm 0.140$	

注: \* 和 \*\* 分别表示杉木林与红锥林之间差异显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )

Note: \* and \*\* indicate significant difference at  $P<0.05$  and very significant difference at  $P<0.01$ , respectively

显不同,杉木林为灌木层>草本层>枯落物层,而红锥林却表现为枯落物层>灌木层>草本层。

### 2.2.3 土壤碳储量及其分配特征

两种林分土壤碳储量如表6所示。杉木林土壤碳储量与红锥林的相差无几,但从相同土层比较,红锥林0—10 cm和10—30 cm土层的碳储量显著高于杉木林( $P<0.05$ ),而在30—50 cm和50—100 cm土层则相反,为杉木林显著高于红锥林( $P<0.05$ ) (图3)。

表6 杉木、红锥人工林的土壤碳储量

Table 6 Soil carbon storage of *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations

土层深度 Soil depth (cm)	杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation ( $\text{t/hm}^2$ )	红锥人工林 <i>C. hystrix</i> plantation ( $\text{t/hm}^2$ )
0—10	$27.19 \pm 0.17^b$	$35.34 \pm 4.27^a$
10—30	$36.32 \pm 3.62^a$	$41.74 \pm 3.90^a$
30—50	$31.38 \pm 3.11^a$	$23.01 \pm 2.71^b$
50—100	$49.66 \pm 4.73^a$	$41.95 \pm 3.62^a$
合计 Total	$144.55 \pm 14.54^a$	$142.04 \pm 14.51^a$

注:不同字母表示同一土壤层次差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different letters indicate significant differences in the same soil layer ( $P<0.05$ )

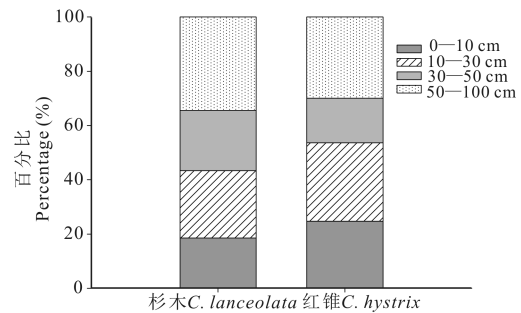


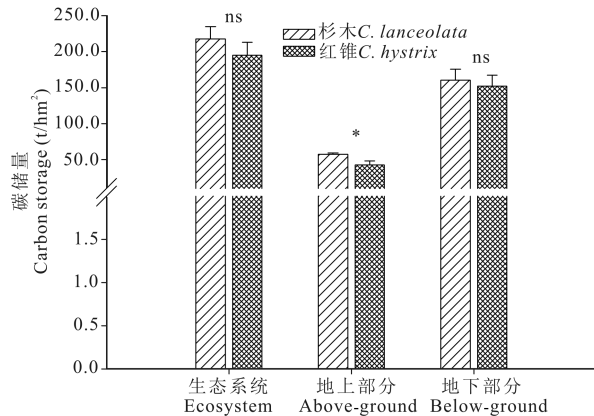
图3 杉木和红锥人工林土壤碳储量分配特征

Fig. 3 Characteristics of carbon storage allocation of soil in *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantations

### 2.3 生态系统各组碳储量及分配特征

由图4所示,杉木人工林生态系统碳储量为 $(217.56 \pm 17.29) \text{ t/hm}^2$ ,红锥人工林为 $(195.05 \pm 17.85) \text{ t/hm}^2$ ,杉木林生态系统碳储量比红锥林高 $22.52 \text{ t/hm}^2$ ,高10.35%,但差异不显著( $P=0.192$ )。将生态系统碳储量分为地上和地下部分比较发现,杉木林地上部分碳储量 $(57.25 \pm 2.28) \text{ t/hm}^2$ 是红锥林地上部分碳储量 $(42.92 \pm 5.40) \text{ t/hm}^2$ 的1.33倍,差异显著( $P<0.05$ );杉木林地下部分碳储量 $(160.31 \pm 15.20) \text{ t/hm}^2$ 与红锥林地下部分碳

储量 ( $152.13 \pm 15.25$ )  $t/hm^2$  差异不显著 ( $P > 0.05$ )。



ns 表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ), \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

ns indicates no-significant differences ( $P > 0.05$ ), \* indicates significant differences ( $P < 0.05$ )

图4 杉木和红锥人工林生态系统碳储量

Fig. 4 Carbon storage of *C. lanceolata* and *C. hystrix* plantation ecosystems

杉木、红锥人工林生态系统碳储量分配如图5所示。杉木林生态系统碳储量分配的百分比从大到小顺序为土壤层(66.37%)>乔木层(32.93%)>灌木层(0.32%)>草本层(0.19%)>枯落物层(0.14%),红锥林生态系统碳储量相应为土壤层(72.81%)>乔木层(26.59%)>枯落物层(0.35%)>灌木层(0.24%)>草本层(0.02%)。由此可见,两种人工林生态系统都是以土壤碳储量占优势,生物量碳储量居次要地位,林下地被物的碳储量比例很小,灌木层、草本层及枯落物层三者的贡献累计不到1%。

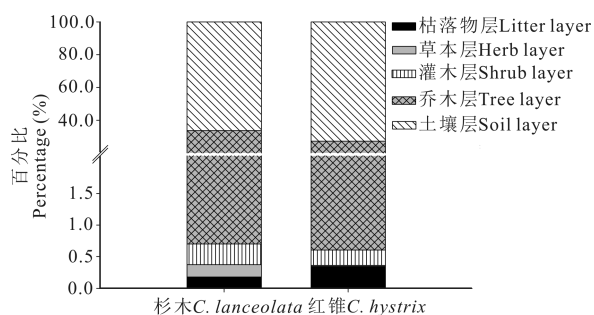


图5 生态系统碳储量分配比例

Fig. 5 Allocation ratio of carbon storage in ecosystem

### 3 讨论

林木不同器官的含碳率受到诸多因素的影响,但国际上研究普遍认为林木的含碳率相对稳定,为47%—59%<sup>[21-22]</sup>。本研究中,杉木和红锥各器官的平

均含碳率分别为48.04%和47.80%,落在林木含碳率的下限。有研究表明,林木不同器官的含碳率变化较大,国内常见木本植物器官的含碳率变化为38.34%—60.50%<sup>[23]</sup>。在本研究中,杉木和红锥各器官的含碳率分别为45.47%—50.12%和44.91%—50.18%,林下植被各组分的含碳率为36.69%—47.73%,枯落物层的含碳率为47.34%—48.45%,也基本属于我国常见木本植物器官含碳率的变化范围内,但红锥林下草本层的含碳率低于38%,这与草本植物含碳率较低的结论是一致的<sup>[24]</sup>。两树种各器官的含碳率非常相似,方差分析结果均无显著差异。这种器官含碳率的高度相似性可能与环境条件的高度相似性有关。早期的研究结果普遍认为,土壤含碳率均会随着土层深度加深而逐渐减小<sup>[25-26]</sup>,这与土壤有机质的分布规律是一致的。本研究表明,红锥林0—10 cm和10—30 cm土层的碳储量显著高于杉木林,而30—50 cm和50—100 cm土层的碳储量则相反,为杉木林显著高于红锥林。究其原因,主要是红锥为浅根性树种,其根系主要分布0—30 cm以上土层,对土壤的改良作用也主要在0—30 cm土层,因此其表层土壤有机碳储量较高;相反,杉木为深根性树种,对较深层土壤的作用较红锥明显<sup>[27]</sup>,因此杉木林土壤中下层的碳储量较高。

植被碳储量和土壤碳储量是评价人工林生态系统吸收和固定CO<sub>2</sub>功能的重要指标<sup>[28]</sup>,兰斯安等<sup>[13]</sup>研究得出杉木不同林龄总碳储量变化规律为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,各林分平均碳储量远高于我国森林植被平均碳储量(57.07 t/hm<sup>2</sup>)。本研究中,杉木乔木层平均碳储量为(71.48±2.74) t/hm<sup>2</sup>,显著高于红锥林的(51.82±6.84) t/hm<sup>2</sup>,也高于我国暖性针叶林植被平均碳储量(49.97 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[28]</sup>,但低于广西北部杉木产主区近熟林(21—25 a)杉木乔木层平均碳储量(85.88 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>,表明虽然研究区域地处杉木分布区的南缘,但该区域属于低山区,海拔在600 m以上,气候温暖湿润,水热条件有利于杉木的生长有关,然而,与杉木主产区相比仍显逊色,这与本研究林分的保留密度较低也有一定的关系。红锥人工林的碳储量低于全国森林植被平均碳储量水平,其原因尚需进一步研究。

本研究发现,杉木人工林下植被的碳储量显著或极显著高于红锥林,前者为1.147 t/hm<sup>2</sup>,而后者仅为0.512 t/hm<sup>2</sup>。这主要是红锥林分郁闭度过高,影

响林下灌木和草本植物的生长,生物量低,加之红锥林下草本植物的含碳率也较低,因而其林下植被的碳储量也较低;而在杉木针叶林中,林分郁闭度较小,灌木和草本植物生长相对茂盛,因此生物量碳储量有较多积累。本研究中,红锥林的枯落物层碳储量显著高于杉木林,这与红锥林的枯落物产量较高有关<sup>[29]</sup>。红锥林高的枯落物产量也是其表层土壤含碳率和碳储量较高的原因之一。

研究表明,两种人工林生态系统都是以土壤碳储量占优势,生物量碳储量居次要地位,林下植被碳储量所占比例小于1%。本研究中,杉木林生态系统和红锥林生态系统的土壤碳储量分别为 144.55 t/hm<sup>2</sup> 和 142.04 t/hm<sup>2</sup>,均低于我国森林土壤平均碳储量 193.55 t/hm<sup>2</sup>,这是由于亚热带水热条件良好,土壤呼吸速率较大,同时由于植被大量吸收土壤中的养分,土壤有机质含量较低,使得土壤碳素积累较少<sup>[26]</sup>。

从碳固持角度来看,杉木人工林乔木层碳储量大于红锥林,杉木林生态系统碳储量(217.56±17.29) t/hm<sup>2</sup> 比红锥林(195.05±17.85) t/hm<sup>2</sup> 高 10.35%,杉木人工林比红锥人工林有更高的碳固持能力,但红锥对提高土壤表层的含碳率和碳储量作用优于杉木人工林。

杉木人工林乔木层、林下植被和生态系统碳储量均高于红锥人工林,红锥人工林枯落物碳储量显著高于杉木人工林,杉木是发展碳汇林的较好树种。

#### 参考文献

- [1] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报,2001,43(9):967-973.
- [2] 周广胜,王玉辉,蒋延玲,等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报,2002,26(2):250-254.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Summary for policymakers [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 刘爽. 森林生态系统碳储量研究进展[J]. 武汉生物工程学院学报,2009,5(3):231-234.
- [5] 廖克服. 高海拔地区火炬松人工林生长与生物量研究[J]. 福建林学院学报,1996,16(4):375-377.
- [6] 李忠佩,王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J]. 应用生态学报,1998,9(4):365-370.
- [7] 刘世荣,杨予静,王晖. 中国人工林发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报,2018,38(1):1-10.
- [8] 刘世荣,温远光,蔡道雄,等. 气候变化对森林的影响及多尺度适应性管理研究进展[J]. 广西科学,2014,21(5):419-435.
- [9] 温远光,张健,严理,等. 豆科植物对石漠化土地生物碳固持能力的影响[J]. 广西科学,2015,22(6):573-577.
- [10] 卢婵江,温远光,周晓果,等. 不同轮伐期对巨尾桉人工林碳固存的影响[J]. 广西科学,2018,25(2):149-157.
- [11] 何友均,覃林,李智勇,等. 西南桦纯林与西南桦×红锥混交林碳贮量比较[J]. 生态学报,2012,32(23):7586-7594.
- [12] 朱积余,蒋邁,潘文. 广西红锥优树选择标准研究[J]. 广西林业科学,2002,31(3):109-113.
- [13] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1125-1134.
- [14] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征[J]. 林业科学,2009,45(8):147-153.
- [15] 熊江波. 亚热带五种人工林生物量和碳储量的研究[D]. 南宁:广西大学,2015.
- [16] 卢立华,贾宏炎,农友,等. 红锥经营模式对林木生长及乔木层碳储量的影响[J]. 东北林业大学学报,2014,42(12):63-74.
- [17] 刘世荣,温远光. 杉木生产力生态学[M]. 北京:气象出版社,2005.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] FINÉR L, MANNERKOSKI H, PIIRAINEN S, et al. Carbon and nitrogen pools in an old-growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1):51-63.
- [20] 骆土寿,陈步峰,陈永富,等. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量[J]. 林业科学研究,2000,13(2):123-128.
- [21] LAIHO R, LAINE J. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 93(1/2):161-169.
- [22] LAMLLOM S H, SAVIDGE R A. A reassessment of carbon in wood: Variation within and between 41 North American species [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4):381-388.
- [23] 田勇燕,秦飞,言华,等. 我国常见木本植物的含碳率[J]. 安徽农业科学,2011,39(26):16166-16169.
- [24] 陈莹,闫淑君,宋宛蓉,等. 4种城市绿化观赏草的碳贮量及其碳汇功能研究[J]. 福建林学院学报,2013,33(4):322-325.
- [25] 侯芳,王克勤,宋娅丽,等. 滇中亚高山5种典型森林乔木层生物量及碳储量分配格局[J]. 水土保持研究,

- 2018, 25(6): 33-39.
- [26] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 925-933.
- [27] 温远光. 不同立地杉木人工林根系的研究[J]. 广西农学院学报, 1986(1): 70-82.
- [28] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000(5): 518-522.
- [29] 卢立华, 贾宏炎, 何日明, 等. 南亚热带6种人工林凋落物的初步研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(3): 346-352.

## Carbon Stocks and Allocation Characteristics of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* Plantations in Southern China

ZHAO Zhang<sup>1</sup>, WEN Yuanguang<sup>2,3,4</sup>, ZHOU Xiaoguo<sup>2,4</sup>, ZHU Hongguang<sup>2,3</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, CAI Daoxiong<sup>1,3</sup>, JIA Hongyan<sup>1,3</sup>, MING Angang<sup>1,3</sup>, LU Lihua<sup>1,3</sup>

(1. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 4. Institute of Ecological Industry, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**Abstract:** Clarifying the carbon stocks and allocation characteristics of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* plantations in southern subtropical China can provide basic data for the study of global climate change, and provide scientific basis for the development of carbon sink forestry. Taking *C. lanceolata* and *C. hystrix* widely cultivated in the subtropical area of China as the research objects, the forest biomass was calculated by the relative growth equation, the biomass of understory vegetation, the carbon content of each component of the forest and understory vegetation, the soil carbon content, etc. were measured. And then the carbon storage and distribution rules of different plantations were analyzed. The results showed that: (1) The carbon content of different components of the artificial forest ecosystem were different. Although the carbon content of the whole plant of *C. lanceolata* and *C. hystrix* was almost the same, being 48.04% and 47.80%, respectively, the carbon content of understory vegetation and soil surface were significantly different, with the carbon concentrations of understory vegetation varying from 40.84% to 47.73% (*C. lanceolata* plantations) and 36.69% to 43.76% (*C. hystrix* plantations). The carbon content of soil surface varied from 2.28% to 3.30%. (2) The carbon stocks of tree layer (71.48 t/hm<sup>2</sup>) and understory (1.533 t/hm<sup>2</sup>) in *C. lanceolata* plantations were significantly higher than that in *C. hystrix* plantations, which were 51.82 t/hm<sup>2</sup> and 1.185 t/hm<sup>2</sup>, respectively. While carbon stock in litter layer was significantly higher in *C. hystrix* plantations (0.673 t/hm<sup>2</sup>) than in *C. lanceolata* plantations (0.386 t/hm<sup>2</sup>). (3) The carbon stocks of bark, leaf and roots in *C. lanceolata* plantations were significantly higher than those in *C. hystrix* plantations. On the contrary, the carbon stock of branch in *C. hystrix* plantations (8.04 t/hm<sup>2</sup>) was significantly higher than that in *C. lanceolata* plantations (6.00 t/hm<sup>2</sup>). (4) There was no significant difference between ecosystem carbon stocks of *C. lanceolata* (217.56 t/hm<sup>2</sup>) and *C. hystrix* (195.05 t/hm<sup>2</sup>) plantations. Soil and tree layers were the major carbon pools of the plantation ecosystems, accounting for 66.37%–72.81% and 26.59%–32.93%, respectively. The tree, understory and ecosystem carbon stocks of *C. lanceolata* plantations were significantly higher than those in *C. hystrix* plantations. The carbon stocks of litter layer in *C. hystrix* plantations were significantly higher than those in *C. lanceolata* plantations. These results highlight that *C. lanceolata* plantations is a good tree species for developing carbon sink forest.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata*, *Castanopsis hystrix*, plantation, rate of carbon content, carbon stock, allocation characteristics

责任编辑: 符支宏